

doi: 10.11720/wtyht.2018.1577

李玉录, 邢利娟, 拜占红, 等. 综合物探方法在青海省跃进山铁矿勘查中的应用[J]. 物探与化探, 2018, 42(5): 889-895. <http://doi.org/10.11720/wtyht.2018.1577>

Li Y L, Xing L J, Bai Z H, et al. The application of comprehensive geophysical prospecting method to the exploration of the Yuejinshan iron deposit in Qinghai [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2018, 42(5): 889-895. <http://doi.org/10.11720/wtyht.2018.1577>

# 综合物探方法在青海省跃进山铁矿勘查中的应用

李玉录, 邢利娟, 拜占红, 刘志华, 王震

(青海省第一地质矿产勘查院, 青海 海东 810600)

**摘要:** 以跃进山铁矿为研究对象, 利用地面高精度磁测和可控源音频大地电磁法两种方法的联合勘查, 达到了最终的勘查目的。本区的地质、物探实际勘查工作表明, 针对地形困难和地质特殊的测区, 选择适合指导本区地质找矿的物探工作方法至关重要, 它直接影响到最终的勘查效果。实践证明, 在本区综合运用地面高精度磁测和可控源音频大地电磁测深取得了良好的地质找矿效果。通过深入研究综合物探异常, 结合研究区地质特征对矿床的找矿前景做出了综合评价, 建立了矿区的地质—地球物理找矿模型, 可为成因类型相似或相同地区找矿提供借鉴意义。

**关键词:** 跃进山磁铁矿; 综合物探方法; 磁化率; 3 维反演; 找矿模型

**中图分类号:** P631      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1000-8918(2018)05-0889-07

## 0 引言

铁矿作为国家的战略性矿产, 国家经济建设、国防建设、战略新兴产业发展需求旺盛, 巩固铁矿国内安全供应能力非常重要。目前, 找矿工作已从浅地表向深部找矿方向发展, 地球物理勘查是深部找矿必不可少的技术方法, 选择合适的地球物理勘查方法指导找矿工作, 往往能取得事半功倍的效果。

在冀东地区太古宙沉积变质铁矿采空区勘查中, 应用高精度磁法、电阻率剖面法、激发化法等常规地球物理勘查方法, 建立了冀东铁矿采空区有效的地球物理勘查组合模型<sup>[1]</sup>。在大庙铁矿斜长岩杂岩体勘查中利用地面高精度磁测确定高磁异常带及其延伸方向, 借助 EH-4 电磁成像系统解析高磁异常带(矿化带)向地下深部延伸情况<sup>[2]</sup>; 在邯邢式铁矿深部找矿中、东昆仑依干巴达铁矿勘查中, 应用磁法为主、重力和电磁测深为辅的技术方法组合进行深部找矿<sup>[3-4]</sup>; 在金山店铁矿接替资源勘查中, 通过地面高精度磁测、井中三分量磁测和可控源音频大地电磁测深等综合物探方法取得了较好的成

果<sup>[5]</sup>; 在鞍山式铁矿勘查中, 综合运用地面高精度磁测、音频大地电磁测深、重力测量等地球物理方法进行了资源潜力的快速评价<sup>[6]</sup>; 在新疆鄯善县某铁矿勘查中, 应用大地电磁测深、磁法测量及激电测深寻找磁铁矿及其空间定位方面效果显著<sup>[7]</sup>; 在河北松山峪地区沉积变质型铁矿勘查中, 通过地面磁测圈定磁异常区, 采用音频大地电磁测深(CSAMT)推断磁性体产状及埋藏深度, 经钻孔验证, 发现多层隐伏的磁铁矿体<sup>[8]</sup>。综上所述, 铁矿勘查中首选的物探方法是地面高精度磁法, 其后依次是可控源音频大地电磁测深、激电测深、重力测量等方法。相比于单一方法测量, 多种方法的组合能取得更好的找矿效果。

本文以跃进山铁矿 I 区为例, 针对本区陡峭险峻的地形条件、独特的地质背景, 选择适合本区的地球物理勘查方法开展测量工作, 指导地质工程部署。

## 1 矿区地质概况

青海省跃进山铁矿位于柴达木盆地东南边缘,

收稿日期: 2017-12-22; 修回日期: 2018-05-11

基金项目: 青海省地质勘查基金项目“青海省都兰县跃进山铁矿普查”

作者简介: 李玉录(1987-), 男, 物化探工程师, 一直从事地球物理找矿工作。

诺木洪乡以南方向的跃进山地区。如图 1 所示, 矿区主要出露地层为古元古界金水口岩群下岩组三岩段( $Pt_{1j}^{1-3}$ ) 和第四纪全新统( $Qh$ )。古元古界金水口岩群下岩组三岩段地层分布于研究区西侧, 零星出

露于本区北、东部, 构成跃进山矿床主要赋矿层位。受华力西期花岗闪长岩体侵入影响, 该地层破碎较为严重。与本区成矿关系密切的岩性有大理岩、蛇纹岩及金云透辉石矽卡岩<sup>[9]</sup>。

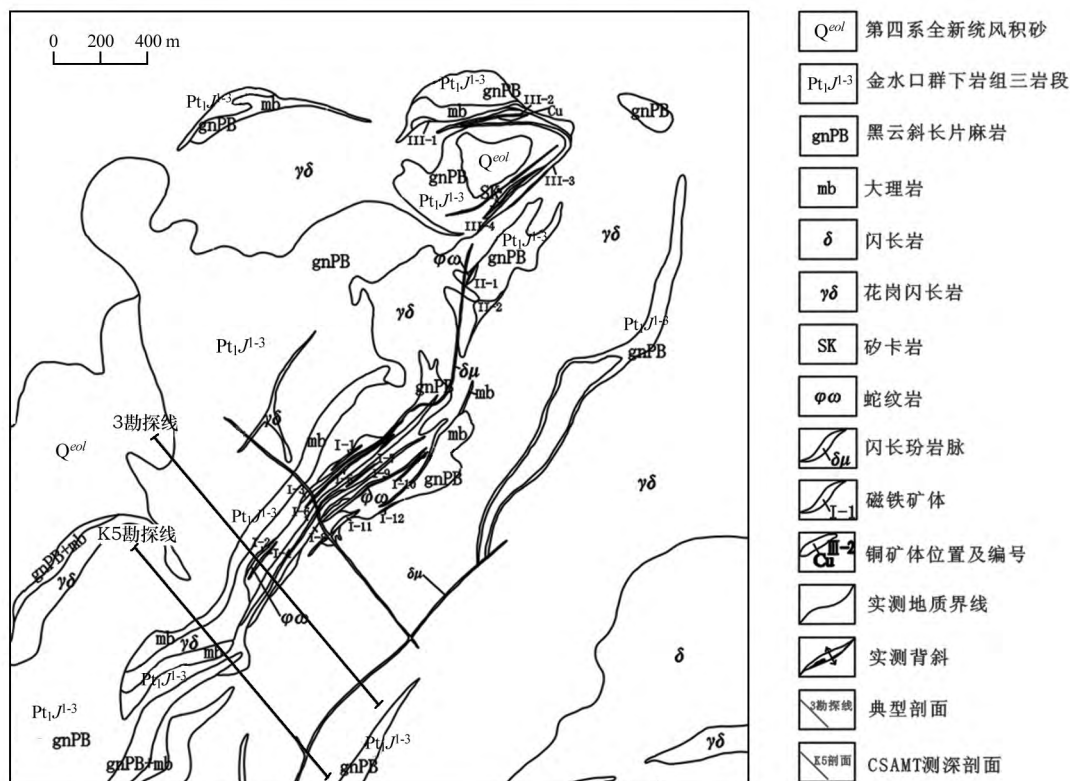


图 1 跃进山磁铁矿区 I 区地质简图

矿区构造简单, 常见褶皱构造, 以跃进山背斜为代表。本区存在平推断层和性质不明断层两种类型的断裂构造, 偶尔见小规模的断裂构造。区内岩浆岩十分发育, 分布面积几乎占整个研究区的 2/3, 为华力西期中酸性侵入岩, 主要有中细粒花岗闪长岩和闪长岩两种岩性, 有花岗伟晶岩脉、闪长玢岩脉、石英脉等脉岩。其中花岗闪长岩体为跃进山磁铁矿床的形成提供了所需的气水热液, 使金属矿物产生蚀变、富聚、沉淀, 所以具有工业价值的跃进山磁铁矿床与该岩体关系密切。

## 2 地球物理特征

物性测量工作表明, 区内出露的岩性除了磁铁矿石、磁铁矿化岩石、角闪岩有较强磁性外, 其余岩性均无磁性或为弱磁性。由岩(矿)石物性参数统计(表 1)可以看出: 研究区磁铁矿石、磁铁矿化大理岩、磁铁矿化蛇纹岩属强磁性岩(矿)石, 其中磁铁矿石磁性最强, 花岗闪长岩、角闪岩等火山岩属弱—

中等磁性, 如大理岩、片麻岩、矽卡岩化片麻岩等无磁铁矿化的变质岩均表现为无磁—弱磁性; 本区磁铁矿石和矿化蛇纹岩的电阻率比较低, 平均为  $259.6 \Omega \cdot m$  和  $62 \Omega \cdot m$ , 均低于  $500 \Omega \cdot m$ ; 其他岩石(围岩)的电阻率较高, 其值均高于  $2000 \Omega \cdot m$ ; 极化率也有类似的关系, 磁铁矿石和矿化蛇纹岩的极化率平均值大于 7%, 其他岩石的极化率值小于 2%。

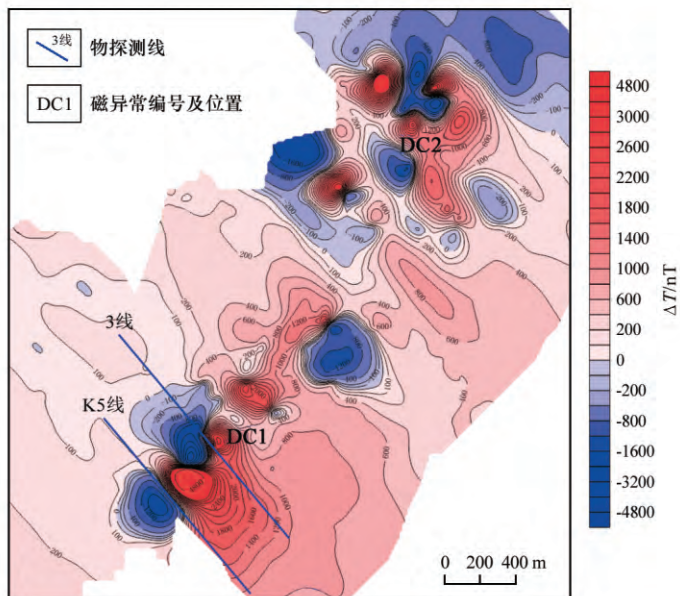
综上所述, 研究区矿石和围岩存在明显的磁性差异、电阻率及极化率差异, 这为后续利用地面高精度磁测及 CSAMT 测深圈定磁铁矿体奠定了物性前提, 也为研究磁法 3D 磁化率反演奠定了基础。

如图 2 所示, 通过地面高精度磁测工作, 根据  $\Delta T$  磁异常等值线平面图在研究区共划分出 6 个高磁异常带, 即 DC1 ~ DC6, 其中 DC1、DC2 磁异常位于 I 区。

DC1 号磁异常形状为带状, 由 3 处子异常组成。磁异常整体为正负伴生, 异常强度大, 幅值高, 梯度陡,  $\Delta T$  异常强度在  $-5965 \sim 7616 nT$  之间。DC2 号磁异常形状为环状, 沿跃进山背斜弧形分布, 异常比

表 1 矿区岩(矿)石物性参数测定统计结果

岩石名称	$\kappa/(4\pi\times 10^{-6}\text{ SI})$		剩余磁化强度 $J_r/(10^{-3}\text{ A/m})$		$\rho/(\Omega\cdot\text{m})$	
	变化范围	常见值	变化范围	常见值	变化范围	常见值
大理岩	0~30	12.2	1.56~5.69	4.87	85~9076	2921
片麻岩	18~320	99.3	7.72~21.27	13.15	2360~5819	3686
花岗闪长岩	0~3800	956	4.47~112.45	26.08	1956~4370	3176
角闪岩	500~2200	1620	205.93~2071.18	1120.10	154~4288	699
磁铁矿化大理岩	3200~30000	9767	17.4~18191.66	3408.09	357~64361	17254
矽卡岩化片麻岩	35~320	149	24~1501	288	109~19651	1980
磁铁矿化蛇纹岩	10000~45000	27500	15.08~152068.01	9525.06	15~109	62
磁铁矿	18000~140000	73500	2745.78~16863	8297.54	22~498	259

图 2 跃进山磁铁矿区 I 区  $\Delta T$  磁异常等值线平面

较明显,强度较大,幅值较高,梯度较陡。在背斜的轴部附近有 3 处较强的孤立子异常,呈串珠状分布, $\Delta T$  极大值为 5 320 nT,由于受构造影响,异常被扭曲、切割,多呈现不规则的三度异常。2 个异常区出露岩性均为华力西期花岗闪长岩、蛇纹岩(DC2 区还含矽卡岩),古元古代金水口岩群黑云斜长片麻岩及大理岩,异常位于花岗闪长岩和黑云斜长片麻岩的接触部位及蚀变形成的蛇纹岩上,推测 DC1、DC2 磁异常的形成与磁铁矿化蛇纹岩关系密切。

### 3 综合物探工作及异常解释

#### 3.1 物探工作方法

通过地面高精度磁法面积测量工作,了解本区磁铁矿的地磁异常特征,在获得地磁异常的基础上利用可控源音频大地电磁法,有针对性地探查磁异常所反映的矿体深部情况。

#### 3.2 全区磁法 3D 磁化率反演研究

为了获得研究区深部磁性体的三维分布情况,

了解跃进山铁矿深部找矿空间及潜力<sup>[10-13]</sup>,结合磁物性资料,使用专业软件对地磁实测  $T$  数据进行了 3D 磁化率反演,反演过程忽略剩余磁化强度的影响。

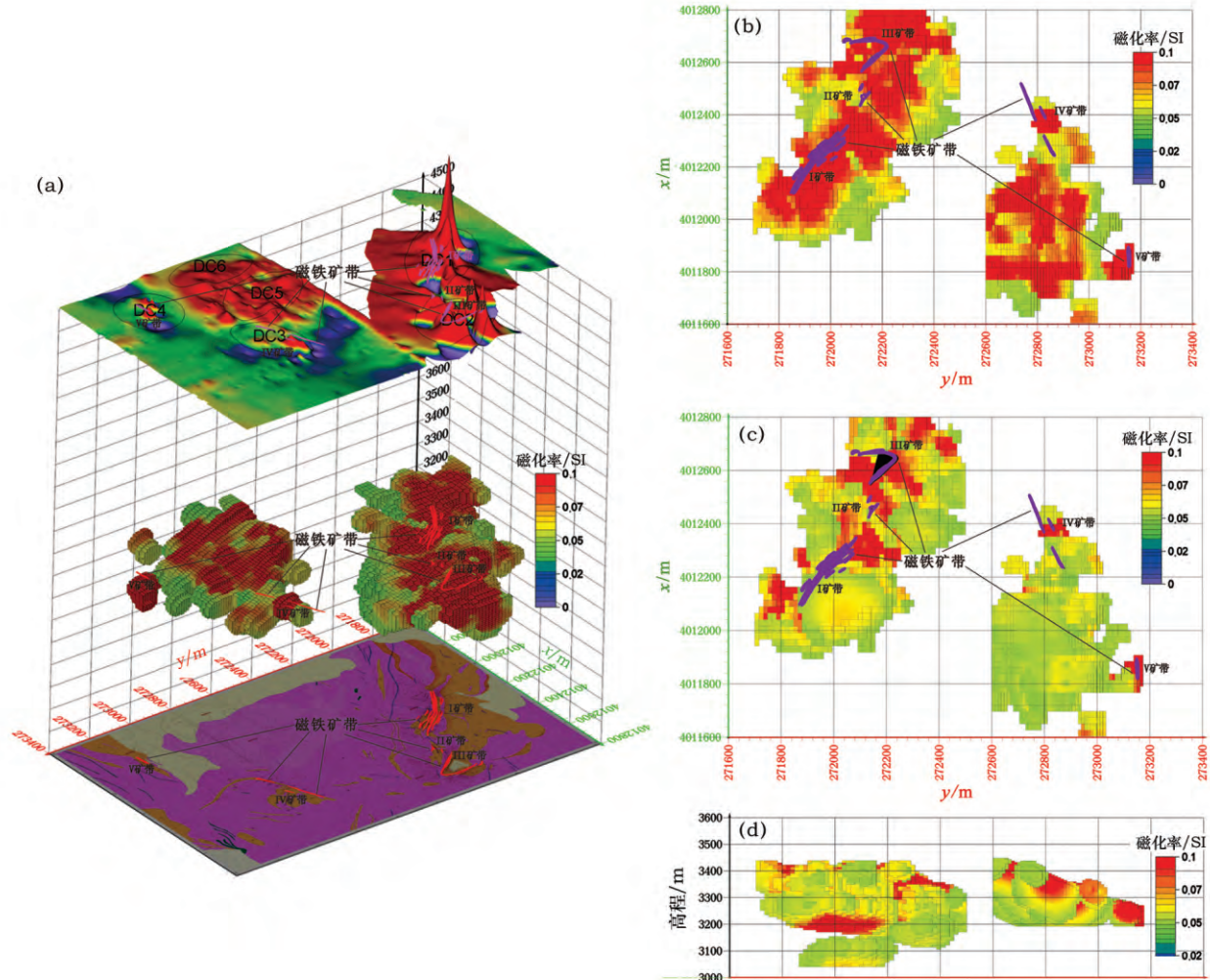
磁法 3D 磁化率反演采用实测磁异常数据,因研究区 I 区、II 区地层走向不一致,分别采用 1 300 m×884 m×701 m、1 200 m×884 m×701 m 两个矩形体为基本剖分单元,将地下 900 m 深度范围内半空间划分为  $200\times 200\times 10=400\,000$  个网格单元作为两个区块(I 区和 II 区)分别进行磁化率反演计算,最后获得拟合均方误差(RMS)为 6.15 的反演结果<sup>[14]</sup>。

本区磁铁矿的平均磁化率值为 0.92 SI,最小值、最大值变化范围 0.23~1.76 SI;蛇纹岩的平均磁化率值为 0.35 SI,最小值、最大值变化范围 0.13~0.57 SI;磁铁矿化大理岩的平均磁化率值为 0.12 SI,最小值、最大值变化范围 0.04 SI~0.38 SI。其他岩石如大理岩、片麻岩、矽卡岩化片麻岩、花岗闪长岩、角闪岩等的平均磁化率均小于 0.02 SI,最小值、最大值变化

范围 0.0~0.05 SI。由此判断,磁化率大于 0.05 SI 的磁性体均为磁铁矿化岩石及磁铁矿的反映,磁化率小于 0.05 SI 的磁性体均为无磁—弱磁性围岩的反映。

如图 3 立体图上可看出,浅地表控制的磁铁矿带绝大多数位于磁化率大于 0.1 SI 的深红色块状磁性体上,个别位于磁化率介于 0.05~0.07 SI 磁性体

区域。如图 3 的平面图所示,从顶面看(图 3a),本区磁化率大于 0.05 SI 的磁性体分布面积占全区面积的 40%,从底面看(图 3b),磁化率大于 0.05 SI 的磁性体分布面积减少无几;从侧面看(图 3d),3 450~3 050 m 的高度内均有强磁性体存在,说明本区磁铁矿带向深部有很大的延伸,本区深部有很好的寻找磁铁矿体的巨大潜力和前景。



a—立体图; b—顶面平面图; c—侧面平面图; d—底面平面图

图 3 研究区磁法 3D 磁化率反演结果

### 3.3 典型剖面磁法 3D 磁化率反演解释

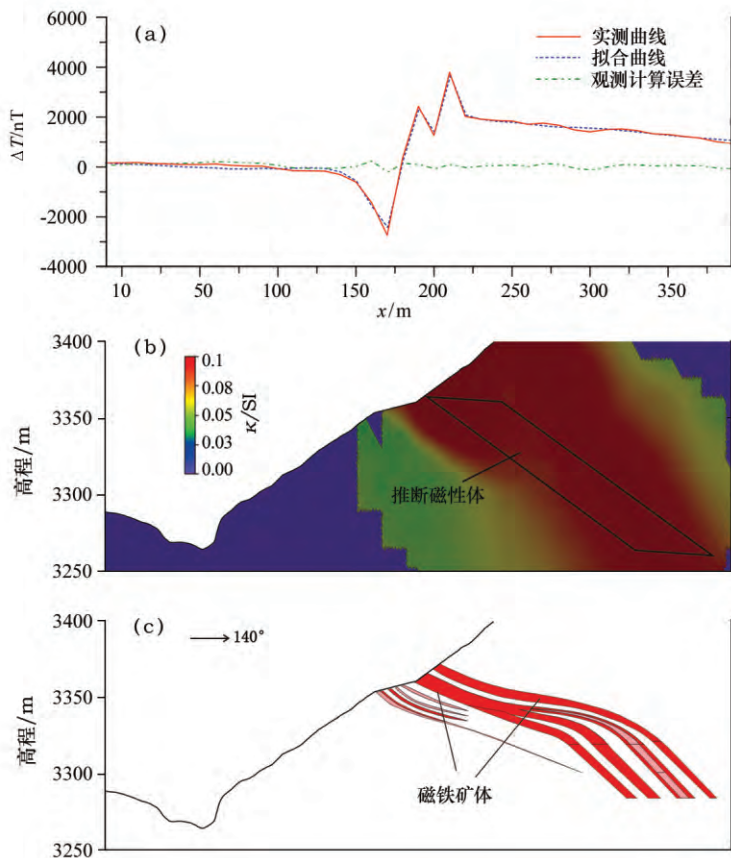
如图 4a 所示,在剖面 120~250 m 段有一处明显的地磁  $\Delta T$  异常,极大值为 3 793 nT,极小值为 -2 739 nT,宽约 130 m;地表主要出露岩性为黑云斜长片麻岩及蛇纹岩,推断该异常为深部强磁性地质体的反映。

为了解磁性地质体在深部的空间展布形态及变化情况,使用 Voxler 软件从 3D 磁化率反演的模型结果中截取出 3 勘探线剖面位置对应的断面切片

(图 4b)。从图上可以看出,在水平 150~300 m、垂向 3 250~3 400 m 段间磁化率大于 0.1 SI,认为该段内存在一处强磁性体,推断该强磁性体为磁铁矿化岩石或磁铁矿的反映。

对比图 4b、c 可以看出,虽然反演计算推断的磁性体与实际控制的磁铁矿体在位置上有些出入,但整体上是吻合的。推断磁铁矿体是引起 3 勘探线磁异常的主要地质体,其在深度方向上有较大延伸。





a—实测  $\Delta T$  及磁化率 3D 反演曲线; b—磁化率 3D 反演结果切片图; c—地质剖面

图 4 研究区 3 勘探线磁化率综合剖面

### 3.4 可控源音频大地电磁测深异常解释

图 5 为 K5 剖面综合勘探结果。从图 5a 可以看出,在 100~340 m 段间存在一处明显的磁异常,异常宽约 240 m;地表主要出露岩性为花岗闪长岩、大理岩及黑云斜长片麻岩。从异常的形态上看,推断该异常为两处磁性地质体引起的叠加异常。

从 3D 磁化率反演的模型结果中截取出 K5 剖面对应的断面切片(图 5b),可以看出在水平 0~340 m、垂向 3 000~3 350 m 段间磁化率大于 0.1 SI,认为该区段内存在 2 处强磁性体(C1、C2),推断强磁性体与磁铁矿化岩石或磁铁矿有关。

检查磁异常时,在该线 100~340 m 段地表未能发现引起磁异常的地质体,怀疑该异常由隐伏的磁铁矿或磁性地质体引起。为了查验深部是否有矿体存在,在此线上布置了一条 CSAMT 测深剖面,测量结果见图 5c。

图 5c 显示,在 100~340 m、3 350~3 000 m 段间发现一处视电阻率异常(JD1),距地表约 150~250 m,呈明显而规则的低阻异常特征。JD1 以  $250 \Omega \cdot \text{m}$  视电阻率值圈定,异常呈椭圆状,低阻体近于直

立,略向南倾,异常上部较小(与 3D 磁化率反演推断的 C1 磁性体对应),向下膨大。该异常位置与地面高精度磁测异常位置及反演磁性体 C2 完全吻合,引起该异常的地质体同时具有“高磁化率、低电阻率”特征,磁化率值高于 0.1 SI,视电阻率值低于  $250 \Omega \cdot \text{m}$ ,这与本区实测磁铁矿石的物性特征相吻合。据此推断 C1、C2 磁性体是磁铁矿体的可能性很大。

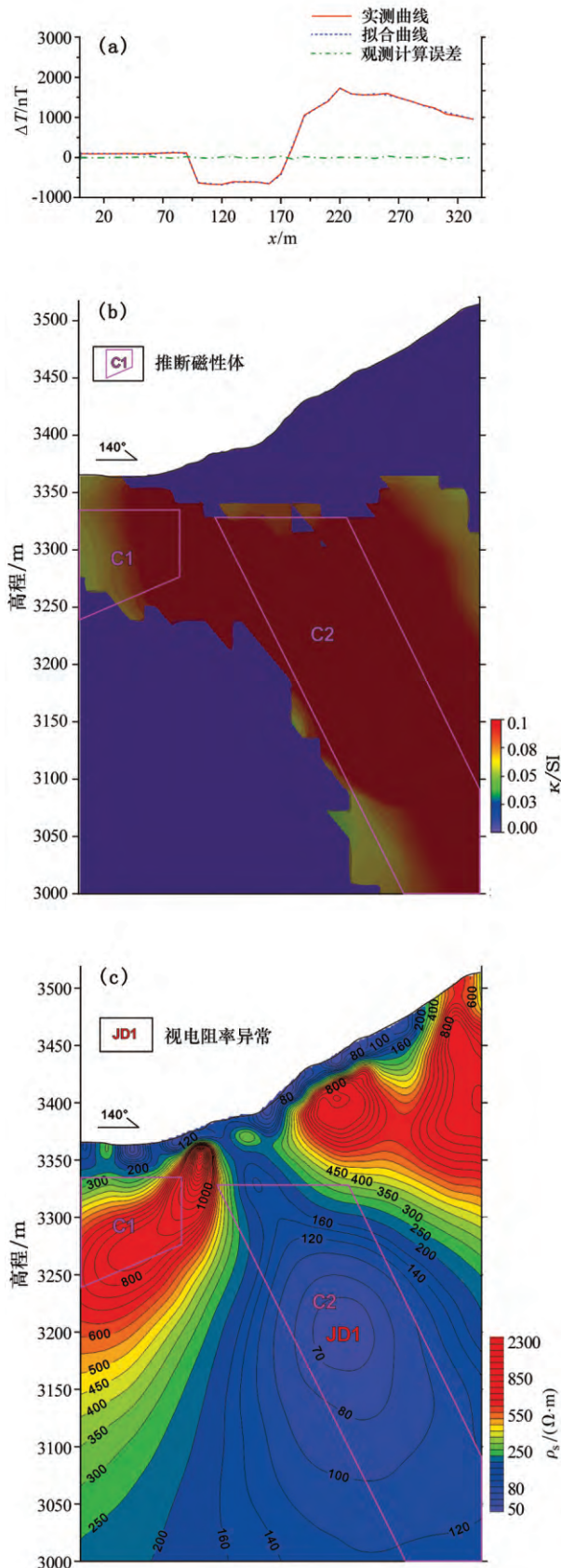
### 3.5 地质工程验证

利用山地工程对推断位于 3 勘探线的磁性体进行了揭露查证,在磁性体位置附近控制到了 4 条工业磁铁矿体、2 条磁铁矿化体。

CSAMT 测深反演结果及磁法 3D 磁化率反演结果表明,该剖面地表没有矿体出露,在深部有厚大、向下延伸较大的板状隐伏矿体存在,之后的地质工程验证了物探推断。

### 3.6 矿床地质-地球物理找矿模型

通过对研究区矿床地质、地球物理、矿化蚀变特征进行研究,综合矿床成因模式及找矿标志,总结出本区矿床地质—地球物理找矿模型(如表 2 所示),



a—实测  $\Delta T$  及磁化率 3D 反演曲线; b—磁化率 3D 反演结果切片图; c—视电阻率拟断面

图 5 研究区 K5 勘探线综合剖面

表 2 跃进山磁铁矿床地质—地球物理找矿模型

标志分类		特征
地质	含矿地层	金水口岩群下岩组三岩段地层
	赋矿岩性	侵入于金水口岩群下岩组三岩段地层的超基性岩体经交代蚀变形成的蛇纹岩 ,磁铁矿化大理岩
	含矿母岩	超基性岩体
	控矿构造	跃进山背斜
	岩 浆 岩	华力西期中酸性侵入岩
	围岩蚀变	硅化、绢云母化、高岭土化、绿泥石化、矽卡岩化、碳酸盐化
	伴生矿化	褐铁矿化、黄铁矿化、孔雀石化
	地表直接找矿标志	蛇纹岩
	矿床类型	岩浆晚期分异型铁矿床
	矿床成因	侵入于早元古代金水口岩群下岩组三岩段地层的超基性岩体经热液蚀变作用全部变质形成磁铁矿化蛇纹岩
地球物理	探测目标	磁铁矿带
	目标物性	低阻( <250 Ω · m) ,高极化率( >8%) ,高磁化率( >10 000×4π×10 <sup>-6</sup> SI)
	地面异常	化极后的强磁异常是浅地表磁铁矿的直接反映 ,垂向二阶导数极大值位置对应地表磁铁矿的出露位置; 上延后的低缓磁异常往往是中深部隐伏磁铁矿的反映
	深部异常	CSAMT 测深低阻异常与磁法 3D 反演出的高磁化率磁性体对应部位为含矿位置

其中地表矿找矿模型与隐伏矿找矿模型在物探异常特征表现方面有一定的差异。

## 4 结论

1) 通过磁法 3D 磁化率反演计算, 基本搞清了高磁化率磁性体在深部空间的分布范围、分布面积、延深等情况, 深部磁性体分布面积占全区工作面积的 40%, 推断在 3 450~3 050 m 高度内有强磁性体存在, 这为后续地质找矿工作指明了方向。利用磁法 3D 磁化率反演结果截面切片图推断的磁性体与地质工程实际控制的磁铁矿体位置基本吻合, 产状基本相近, 说明利用剖面 3D 磁化率反演计算切片图在本区指导地质工程布设是可行的、有效的。

2) 通过可控源音频大地电磁测深工作, 验证了在 K5 勘探线深部存在矿体的事实, 并进一步了解了磁铁矿体在深部的空间位置和赋存形态。磁法 3D 磁化率反演切片图显示的高磁化率磁性体位置与 CSAMT 测深反演圈定的低阻异常位置吻合度较

高视电阻率低阻异常与高磁化率磁性体重合部位一般为磁铁矿体存在位置。

3) 本区综合物探勘查工作表明, 针对地形困难和地质特殊的测区, 选择适合指导本区地质找矿的物探工作方法显得非常重要, 它直接影响最终的勘查效果。实践证明, 在本区综合运用地面高精度磁测和可控源音频大地电磁测深可取得良好的地质找矿效果。

#### 参考文献:

- [1] 彭朝晖, 张家奇, 肖金平. 综合地球物理方法在冀东铁矿采空区勘查中的应用[J]. 物探与化探, 2007, 31(4): 354-357.
- [2] 张鲁新, 张作伦, 曾庆栋. 综合地球物理方法在大庙铁斜长岩杂岩体中的应用[J]. 中国矿业, 2008, 17(7): 96-99.
- [3] 田文法, 郝俊杰, 严加永. 综合地球物理方法在邯邢式铁矿深部找矿中的应用[J]. 地球物理学进展, 2010, 25(4): 1442-1452.
- [4] 姚卫星, 蒋忠祥, 杨春雨. 综合物探法在东昆仑依阿巴达铁矿勘查中应用[J]. 新疆地质, 2012, 30(4): 493-497.
- [5] 高宝龙, 陶德益, 詹应林. 等. 大冶铁矿接替资源勘查项目中“空、地、井”磁法测量的应用[J]. 地质与勘探, 2010, 46(3): 483-490.
- [6] 张壮, 刘建明, 于昌明. 等. 综合地球物理方法在鞍山式铁矿勘查中的应用——以内蒙古敖汉旗四家子铁矿为例[J]. 地球物理学进展, 2013, 28(4): 2078-2084.
- [7] 柳建新, 吴岩, 程云涛. 综合物探法在新疆鄯善县某铁矿勘查中的应用[J]. 工程地球物理学报, 2014, 11(5): 708-713.
- [8] 颜正信, 张兴康, 张龙. 等. 综合物探方法在河北松山峪地区铁矿勘查中的应用[J]. 矿产勘查, 2017, 8(3): 426-433.
- [9] 许长坤, 刘世宝, 赵子基. 等. 青海省东昆仑成矿带铁矿成矿规律与找矿方向研究[J]. 地质学报, 2012, 86(10): 1621-1678.
- [10] 姚长利, 郝天珧, 管志宁. 等. 重磁遗传算法三维反演中高速计算及有效存储方法技术[J]. 地球物理学报, 2003, 46(2): 252-258.
- [11] 姚长利, 郝天珧, 管志宁. 重磁反演约束条件及三维反演技术策略[J]. 物探与化探, 2002, 26(4): 253-256.
- [12] 姚长利, 郑元满, 张聿文. 重磁异常三维物性反演随机子域方法技术[J]. 地球物理学报, 2007, 50(5): 1576-1583.
- [13] 陈召曦, 孟小红, 郭良辉. 重磁数据三维物性反演方法进展[J]. 地球物理学进展, 2012, 27(2): 503-511.
- [14] 何敬梓, 范正国, 黄旭钊. 等. 红格铁矿三维反演与地质建模[J]. 地质与勘探, 2015, 51(6): 1049-1058.

## The application of comprehensive geophysical prospecting method to the exploration of the Yuejinshan iron deposit in Qinghai

LI Yu-Lu, XING Li-Juan, BAI Zhan-Hong, LIU Zhi-Hua, WANG Zhen

(The First Geological and Mineral Prospecting Institute of Qinghai Province, Haidong 810600, China)

**Abstract:** In this paper, the authors utilized the high-precision ground magnetic survey and Controlled Source Audio Frequency Magnetotelluric (CSAMT) technique to study the Yuejinshan iron deposit in Qinghai Province. The integrated geological and geophysical survey in this area shows that it is vital to design appropriate strategies and adopt suitable methods for ore explorations in areas of complex topography and geological setting. The choice of strategies and methods has a direct and significant influence on the final survey results. The studies also indicate that a combination of high-precision ground magnetic survey and CSAMT technique can produce highly reliable survey results for this area. The authors made an integrated evaluation for the mine exploration prospect in Yuejinshan area based on an analysis of local geological settings and geophysical anomalies. The geological-geophysical prospecting model developed in this study can serve as a valuable prototype for mine exploration in areas with similar geological evolution settings.

**Key words:** Yuejinshan magnetite deposit; integrated geophysical exploration; magnetic susceptibility; 3D inversion; prospecting model

( 本文编辑: 沈效群)